

Б. Б. Зобнин, В. В. Кочетков, С. К. Ужегов,
Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ГРАФ, ОПИСЫВАЮЩИЙ ВАРИАНТЫ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСА ОЧИСТКИ ШАХТНОЙ ВОДЫ

A methodological approach to the selection of «routes» for mine water treatment that minimize environmental and economic risk is proposed. The «routes» of mine water treatment are described by a oriented graph.

Проект, выполняемый нашим коллективом, направлен на создание мобильного технологического комплекса первичной очистки кислых рудничных вод (КРВ), позволяющего очистить КРВ до уровня, допускающего их сброс на рельеф, а выделенный твердый осадок направлять на дальнейшую переработку в стационарных условиях, где извлечение металлов из техногенного сырья производится методом центробежного конвертирования с применением плазматрона. В настоящее время завершены фундаментальные исследования по проекту (Шифр лота: 2019-05-576-0001. Отбор инновационных проектов, направленных на проведение прикладных научных исследований и получение результатов, необходимых для реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации, определенных Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации (противодействие техногенным угрозам, повышение эффективности очистки шахтных вод с извлечением из них тяжелых металлов)).

Актуальность проекта заключается в том, что минимизируя экологический риск для населения региона, он обеспечивает вовлечение в переработку цветных и благородных металлов, а также редкоземельных элементов, решая задачу импортозамещения и расширения минерально-сырьевой базы РФ [1].

Задача поиска наилучшего проектного решения состоит в поиске такой точки вектора $x^* \in G$, в которой функция Φ достигает максимума, т. е.

$$\Phi(x^*) = \sup \Phi(x), \quad x \in G \subseteq E^n. \quad (1)$$

Область G задается системой неравенств или равенств:

$$\begin{aligned} R_i(x_1, x_2, \dots, x_n) &\leq 0, \quad i = 1, \dots, m \\ L_i(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0, \quad i = m + 1, \dots, m + p \end{aligned} \quad (2)$$

Если критерий зависит от неконтролируемых факторов, то выбор параметров x не определяет однозначно величины Φ и два разных проекта x и \hat{x} , которые могут при разных реализациях ξ_1, \dots, ξ_k оцениваться по-разному.

На верхнем иерархическом уровне решается задача выбора технологии очистки шахтных вод и извлечения из них металлосодержащего осадка. Критерием выбора технологии является величина эколого-экономического риска, обусловленного самоизливом шахтных вод. Степень риска R описывается функционалом F_R , связывающим вероятность P возникновения неблагоприятного события и тяжесть ущерба U от этого неблагоприятного события [2]:

$$R = F_R \{U, P\} = \text{SUM} [G_i F_{ri}(U_i, P_i)], \quad (3)$$

где i – виды неблагоприятных событий; G_i – весовые функции, учитывающие степень важности неблагоприятных событий.

Общий ущерб U определяется как сумма социального ущерба L , экономического ущерба E и экологического ущерба Y :

$$U = L, E, Y = \text{SUM} [F_{Ui}(U_{Li}, U_{Ei}, U_{Yi})]. \quad (4)$$

Социальный ущерб связан с гибелью людей, потерей здоровья и ухудшением условий жизни. Экономический ущерб связан непосредственно с повреждением или утратой основных и оборотных фондов, материальными потерями населения и также включает затраты на ограничение развития ЧС. Экологический ущерб связан с ущербом, наносимым природной среде.

Для конкретной технологии очистки шахтных вод состояние мобильного технологического комплекса на нижнем иерархическом уровне характеризуется величиной удельных затрат на очистку 1 м³ шахтной воды и извлечения из нее металлосодержащего осадка, которые рассчитываются по формуле:

$$S(x) = \sum_{r \in R} S_r(x_r) + \sum_{r \in R} \sum_{\omega \in \Omega} pr^\omega S_r^\omega(x_r, y_r^\omega) \quad , \quad (5)$$

где Pr^ω – вероятность исхода ω ;

$y^\omega = x^\omega - x$ – отклонения фактического режима от расчетного режима;

$S_r(x_r)$ – расчетные затраты в r -м элементе системы.

Первое слагаемое в выражении (5) описывает приведенные затраты на очистку шахтной воды, определяемые структурой мобильного комплекса и типами используемого оборудования. Общие затраты в каждом элементе системы включают в себя затраты на приобретение оборудования; удельные эксплуатационные затраты. Увеличение первого слагаемого определяется, в частности, ростом тарифов на энергоносители.

Второе слагаемое в выражении (5) описывает изменения затрат в r -м элементе, вызванные отклонениями фактического режима по отношению к расчетному. Это слагаемое увеличивается, при неадекватной реакции системы управления на изменение расходов шахтной воды и концентраций извлекаемых компонентов в воде. Очевидно, что для решения задачи необходимы две стратегии управления: стратегическая и тактическая. Первая из стратегий реализуется с использованием переменных, которые не могут изменяться на протяжении определенного периода времени и требуется найти их оптимальные значения с использованием модели инвестиционного комплекса, обеспечивающего очистку шахтной воды новыми фондами. Вторая из стратегий реализуется с использованием режимных параметров, которые можно менять в темпе с процессом и требуется найти оптимальное распределение на множестве их допустимых значений.

В плане подготовки к реализации проекта решена задача управления природно-технологическим комплексом как конфликтно-управляемой системой, минимизирующей эколого-экономический риск, обусловленный самоизливом шахтных вод [3].

Мобильный технологический комплекс с позиции способов очистки шахтной воды, описывается технологическим графом $\tilde{A}(J, F)$, являющимся совокупностью двух множеств: вершин J «разделяющих» отдельные операции

очистки шахтной воды и дуг F , соответствующих альтернативным вариантам реализации технологических операций. Последовательность дуг определяется допустимой последовательностью выполнения операций. Так как элементы множества F представляют собой упорядоченные пары, то граф является ориентированным (орграфом).

Представление в виде орграфа обеспечивает наглядность и поддерживает объем данных, необходимый для оценки вариантов построения комплекса очистки шахтной воды. Дуги графа $\tilde{A}(J, F)$ описывают «маршруты» очистки шахтной воды $F = (F_1, F_2, \dots, F_k)$, включающие в себя множество технологических операций $O = (O_1, O_2, \dots, O_n)$, где O_1 – откачка насосами воды из шахты, O_2 – подача воды на мобильный комплекс, O_3 – формирование аэрозоля, поступающего в реактор; O_4 – диспергация аэрозоля; O_5 – формирование разряда, генерирующего активные частицы; O_6 – перевод ионов тяжелых металлов в нерастворимые карбонаты; O_7 – извлечение полезных компонентов в виде оксидов различных металлов, осажденных из водных растворов их солей. Каждая из ТО может выполняться различными способами. В качестве примера приведем варианты выполнения операций O_4 и O_5 (рис.).

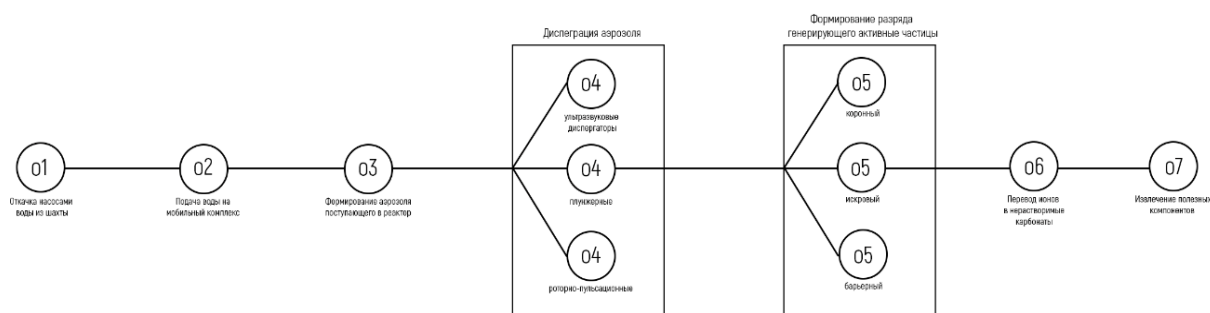


Рис.1. Пример орграфа очистки шахтной воды

Таким образом, под маршрутом в графе будем понимать чередующуюся последовательность смежных вершин и ребер. Каждый маршрут характеризуется удельными затратами ресурсов на очистку шахтной воды. Последовательность

технологических операций через соответствие множества операций O и множества конструктивных решений преобразуется в последовательность ТО $M_i = (m_{i1}, m_{i2}, \dots, m_{il})$, реализующую маршрут F_i . Каждый маршрут представляется направленной цепью дуг $(m_{i1}, m_{i2}), (m_{i2}, m_{i3}), \dots, (m_{il-1}, m_{il})$, включающей в себя, в общем случае, и переходы через ТО, не участвующие в данном маршруте. Некоторые вершины M_i могут расщепляться, образуя новые вершины $m_{i1}, m_{i2}, \dots, m_{ik}$ с соответствующим расщеплением окрестностей $I(m_i), O(m_i)$ на $I(m_{i1}), \dots, I(m_{ik}), O(m_{i1}), \dots, O(m_{ik})$, что реализует введение в технологический комплекс нескольких модификаций ТО.

Например, компрессор может быть реализован с использованием различных клапанов или в бесклапанном исполнении. В результате увеличивается число вершин технологического графа. Множество вновь вводимых вершин обозначим ΔM . Каждая дуга $f = (m_i, m_j)$ взвешивается характеристиками эффективности соответствующей ТО. Эффективность каждой технологической операции характеризуется величинами относительных потерь в натуральном и денежном выражении. Каждой дуге приписываются веса, соответствующие затратам на выполнение данной операции конкретным способом, производительности этой операции и энергетическим потерям, т. е. каждая дуга характеризует несколько типов связей между вершинами.

Маршруты отличаются друг от друга наличием или отсутствием определенных технологических операций, способами выполнения этих операций, возможностями контроля состояния процесса, соответствующими затратами и эффективностью. Общее число всех возможных вариантов N технологических маршрутов определяется так:

$$N = \prod_{l=1}^L k_l, \quad (6)$$

где k_l – число возможных способов реализации l -й функции,
 L – число всех функций системы.

Таким образом, предложенная концепция позволяет формализовать задачу проектирования мобильного комплекса очистки кислых рудничных вод и извлечения из них тяжелых металлов на верхнем и нижнем иерархических уровнях и найти решения минимизирующие эколого-экономический риск.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зобнин, Б. Б., Сурин, А. А. Информационная поддержка выбора технологии переработки шахтных вод / Труды конгресса с международным участием «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» : «Техноген-2019» – Екатеринбург: УрО РАН, 2019. – С. 493–496
2. Музгалеvский, А. А., Карлин, Л. Н. Экологические риски: теория и практика / А. А. Музгалеvский, Л. Н. Карлин. – СПб.: РГГМУ, ВВМ, 2011. – 448 с.
3. Зобнин Б. Б., Моруна, С. И. Об одной задаче управления с ограничением на число переключений // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2000. – № 2. – С. 72–77.